Н. Д. ДЫМОВИЧ

Слой F_2

ЗОНА ЗЕМНОГО ЛУЧА

ЗОНА МОЛЧАНИЯ

ОСВЕЩЕННАЯ ЗОНА

Ионосфера и ее исследование

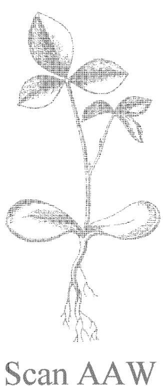


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 513

Н. Д. ДЫМОВИЧ

ИОНОСФЕРА И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.371.32

Д88

Содержатся основные сведения об ионосфере и ее влиянии на распространение коротких и ультракоротких радиоволн. Рассказывается об эффекте Кабанова и его практическом значении. Излагаются принцип действия автоматической ионосферной станции и методы исследования ионосферы с помощью геофизических ракет и искусственных спутников Земли.

Брошюра рассчитана на радиолюбителей, занимающихся коротковолновой радиосвязью, а также на широкий круг читателей, интересующихся строением ионосферы и методами ее исследования.

Дымович Николай Дмитриевич
Ионосфера и ее исследование. М.—Л., Издательство «Энергия», 1964. 40 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 513).
Темплан 1964 г, № 339

Редактор *А. И. Кузьминов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 12/XII 1963 г. Подписано к печати 4/III 1964 г.
Т-04204 Бумага 84×108¹/₃₂ 2,05 печ. л. Уч.-изд. л. 2,9
Тираж 25 000 экз. Цена 12 коп. Зак. 653

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферой называют область земной атмосферы, расположенную примерно на высоте от 60 до 20 000 *км*. Она представляет собой ионизированные слои атмосферы. Ионизация атомов и молекул воздуха происходит в основном под действием ультрафиолетового и корпускулярного излучений Солнца.

Существуют также и другие источники ионизации верхних слоев атмосферы, например метеоры, падающие на Землю в большом количестве; они пронизывают плотные слои атмосферы и сгорают в ней, вызывая ионизацию окружающей атмосферы.

Одновременно с процессом ионизации происходит противоположный процесс — деионизации или рекомбинации. В совокупности эти два процесса являются причиной непрерывных изменений в ионосфере.

Ионизация зависит от многих геофизических процессов. К ним в первую очередь необходимо отнести явления, связанные с солнечной деятельностью. Солнечное воздействие на Землю не остается постоянным. Оно изменяется по очень сложным законам. Например, с периодичностью в 11 лет изменяется число солнечных пятен, представляющих собой глубокие воронки на поверхности Солнца с вихревым движением материи, которые возникают в результате бурной деятельности Солнца. Кроме того, на Солнце время от времени возникают кратковременные вспышки, сопровождающиеся усилением всех видов радиаций, излучаемых Солнцем. С солнечной деятельностью тесно связаны изменения магнитного поля Земли, полярные сияния и космические лучи.

Таким образом, ионосфера находится в непрерывных изменениях, связанных с деятельностью Солнца. Эти изменения находятся во взаимосвязи также и с другими геофизическими явлениями. Поэтому процессы, происходящие в ионосфере, должны изучаться в связи с изучением солнечной деятельности и геофизических явлений.

Основное свойство ионосферы заключается в ее способности отражать и рассеивать радиоволны. Это свойство используется для распространения радиоволн на большие расстояния. Благодаря отражению радиоволн от ионосферы происходит распространение коротких радиоволн на несколько тысяч километров. В последние годы благодаря открытию советского ученого Н. И. Кабанова ионосфера используется для радиолокации на сверхдальние расстояния.

Свойство ионосферы рассеивать падающие на нее радиоволны используется для передачи метровых радиоволн на расстояния от 1 000 до 2 000 *км* без промежуточных ретрансляционных станций. На использовании этого свойства работают линии ионосферного рассеивания для передачи радиотелеграфных и радиотелефонных сообщений.

Распространение коротких радиоволн происходит благодаря отражению от области F_2 ионосферы, расположенной примерно на высоте 300 *км*. Ниже ее находятся области E и D. В процессе распространения радиоволны дважды пронизывают области E и D. При этом волна испытывает некоторое поглощение.

При сильных солнечных вспышках происходит резкое увеличение ионизации нижних слоев ионосферы; оно сопровождается поглощением радиоволн, которое бывает настолько сильным, что радиосвязь на коротких волнах на больших расстояниях полностью прекращается. Эта особенность представляет собой значительный недостаток линии коротковолновой радиосвязи, особенно в полярных районах, где часто наблюдаются ионосферные поглощения.

Для борьбы с поглощением в ионосфере стремятся работать на более высоких частотах, так как они менее подвержены поглощению.

Однако беспредельно увеличивать частоту невозможно. Для каждого состояния ионосферы существует максимальная частота, выше которой радиоволны уже не могут отражаться ионосферой и будут ее пронизывать. Таким образом, для хорошей работы коротковолновой линии радиосвязи необходимо удовлетворять двум противоречивым требованиям: с одной стороны, стремиться работать на более высокой частоте, с другой стороны — нельзя превосходить максимальную частоту для данного состояния ионосферы.

Бесперебойную работу линий радиосвязи обеспечивает служба прогнозов состояния ионосферы. Прогнозирование состояния ионосферы, а в связи с этим и выбор рабочих частот на линиях радиосвязи осуществляются на основании непрерывных наблюдений за ионосферой и знаний основных законов о процессах, происходящих в ней.

За состоянием ионосферы непрерывно наблюдают при помощи автоматических ионосферных станций, которые обычно входят в комплекс магнитно-ионосферных обсерваторий. Около 20 ионосферных станций, расположенных в разных частях Советского Союза, ведут наблюдения за состоянием ионосферы. Ионосферная служба ведет оперативный контроль за состоянием ионосферы и позволяет прогнозировать условия распространения коротких волн.

На ионосферных станциях непрерывно наблюдают за высотой отражающих ионосферных слоев и так называемой критической частотой каждого слоя.

Ионосферные станции — не единственное средство исследования ионосферы. Ионосферу изучают также на станциях возвратно-наклонного зондирования, работа которых основана на использовании эффекта Кабанова. Разработаны и находятся в действии на многих ионосферных станциях установки для измерения поглощения в ионосфере. Для изучения тонкой структуры ионосферы используют станции для исследования ионосферных неоднородностей.

Перечисленная аппаратура представляет собой сложные радиотехнические устройства. С ее помощью исследуют разнообразные процессы, происходящие в ионосфере.

Особую роль в исследовании ионосферы сыграл Международный геофизический год, который проводился в течение 1957—1958 гг. Для этой цели многие магнитно-ионосферные обсерватории были оснащены современными ионосферными станциями, аппаратурой для изучения поглощения и неоднородностей в ионосфере. Наблюдения на станциях проводились по единой программе и в согласованное время.

В последние годы для изучения ионосферы стали применять мощные геофизические ракеты и искусственные спутники Земли. Это открыло новые перспективы в исследованиях ионосферы. Стало возможным проводить непосредственные измерения в ионосфере. Уже первые запуски геофизических ракет, искусственных спутников Земли и космических кораблей позволили сделать ряд важных открытий. Например, было обнаружено, что ионосфера простирается до высоты 20 000 *км*. Было экспериментально установлено, что в ионосфере отсутствуют большие провалы ионизации между слоями, как это представляли раньше. В действительности по мере увеличения высоты примерно до 300 *км* концентрация электронов плавно увеличивается от слоя к слою и имеет своеобразный ступенчатый вид. Нет сомнения, что дальнейшее развитие техники, и в том числе ракетной, позволит еще больше углубить исследования ионосферы, шире овладеть закономерностями процессов, происходящих в ней, и поставить их на службу человеку.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ

О существовании ионизированной области в атмосфере высказывали предположения многие исследователи еще в конце прошлого столетия. Такое предположение позволяло объяснить изменения магнитного поля Земли.

В 1902 г., всего через несколько лет после открытия А. С. Поповым распространения радиоволн, английские ученые Кеннели и Хевисайд высказали гипотезу о существовании в атмосфере поверхностей, отражающих радиоволны, т. е. ионизированной области. Согласно гипотезе от этой области происходит отражение радиоволн и благодаря этому распространение их на большие расстояния. Большую роль в подтверждение этой гипотезы сыграли радиолюбители, которые с помощью маломощных коротковолновых передатчиков устанавливали радиосвязи на очень большие расстояния.

Исключительно важное для практики свойство ионосферы отражать радиоволны, благодаря чему можно создавать линии радиосвязи на очень большие расстояния, побудило исследователей многих стран, и в том числе Советского Союза, начать интенсивные экспериментальные и теоретические исследования структуры ионосферы, а также процессов, происходящих в ней.

В начале 20-х годов советский ученый М. В. Шулейкин установил, что в ионосфере должно быть по крайней мере два максимума электронной концентрации: один на высоте порядка 100 *км*, а другой на высоте 200 *км*. Анализируя результаты измерений напряженности поля дальних радиостанций в различных пунктах земной поверхности, он пришел также к выводу о существовании в ионосфере неоднородностей, имеющих форму облаков. В результате отражения радиоволн от таких облачных образований к антенне приемного устройства могут прийти два и более лучей, при сложении которых возможно либо усиление, либо ослабление (замирание) принимаемого сигнала. Итогом работы М. В. Шулейкина была разработка основ современной теории преломления радиоволн в ионосфере. Его работы о влиянии ионосферы на распространение радиоволн нашли дальнейшее развитие в последующих исследованиях Л. А. Жекулина, В. Л. Гинзбурга и ряда других ученых.

В середине 20-х годов одной из актуальных проблем была проблема распространения коротких волн. Освоение техники коротких волн и использование их для радиосвязи на большие расстояния тормозились незнанием законов их отражения от ионосферы.

Началом широких экспериментальных исследований ионосферы в СССР можно считать второй Международный полярный год, проводившийся в 1932—1933 гг.— в годы минимума солнечной активности. Начало этих исследований связано с именем руководителя Нижегородской радиолаборатории М. А. Бонч-Бруевича. В 1932 г. под его руководством были проведены первые в СССР ионосферные измерения, для проведения которых необходимо было создать новую аппаратуру. Предложенный Бонч-Бруевичем принцип использования маломощных ламп специальной конструкции для получения больших мощностей в импульсе нашел впоследствии применение во всех ионосферных, в том числе и современных станциях. Ионосферная станция, построенная Бонч-Бруевичем, проводила радиозондирование ионосферы сначала в Ленинграде, а потом в Мурманске.

Основным элементом схемы ионосферного передатчика, построенного Бонч-Бруевичем, был самовозбуждающийся ламповый генератор, который отдавал свою энергию антенне. Анодное питание генератора осуществлялось от выпрямителя напряжением 20 000 *в*. Оно накапливалось на конденсаторе и подавалось на аноды ламп генератора в моменты времени, когда конденсатор с помощью контакта подсоединялся к генератору. Контакт представлял собой конец иглы, вращаемый электродвигателем со скоростью 50 *об/сек*. Отраженные от ионосферы импульсы принимались приемным устройством, расположенным недалеко от передатчика, и регистрировались осциллографом.

В том же 1932 г. начала действовать еще одна ионосферная станция, установленная в Москве на Радиоиспытательной станции, где наблюдения проводились на фиксированных частотах.

Большое значение в изучении ионосферы сыграло экспериментальное изучение особенностей распространения коротких радиоволн. В конце 20-х годов под руководством М. А. Бонч-Бруевича организовываются такие исследования. В Нижегородской радиолаборатории (г. Горький) был установлен опытный коротковолновый передатчик, сигналы которого принимались в разных городах Советского Союза. Одновременно с этим приемная станция вела систематические наблюдения за прохождением коротких волн от передатчиков, установленных в разных городах Советского Союза.

Большую роль в изучении ионосферы сыграл физико-математический факультет Томского университета, а позднее — Сибирский физико-технический институт.

В 1925 г. М. А. Бонч-Бруевич обратился к ректору Томского университета с предложением включиться в работу по изучению распространения коротких волн. Предложение было принято, и в короткое время была организована опытная линия коротковолновой связи Томск—Нижний Новгород. В результате круглосуточной работы в течение 4 лет был получен большой экспериментальный материал, который помог установить основные законы распространения коротких радиоволн.

В 1929 г. при Томском университете была впервые в СССР осуществлена опытная коротковолновая связь между движущимися судовыми и неподвижными береговыми радиостанциями.

В 30-е годы работы по изучению распространения коротких волн и влиянию на них ионосферы продолжались под руководством В. Н. Кессениха. Большое значение в проведении этих работ сыграл известный в то время коротковолновик-радиолюбитель Н. Д. Булатов.

К середине 30-х годов при Томском университете сформировался коллектив опытных радиоспециалистов и исследователей. В 1936 г. здесь под руководством Н. Д. Булатова создается ионосферная станция, которая с тех пор ведет непрерывные наблюдения за состоянием ионосферы. За 27 лет непрерывной работы станции накоплен экспериментальный материал более чем за два 11-летних цикла солнечной активности. Обработка и анализ этого материала в значительной степени помогли выявлению основных особенностей строения ионосферы и процессов, происходящих в ней.

Опыт изучения ионосферы показал, что для наблюдения за быстрыми изменениями ее состояния необходимо иметь возможность получать характеристику состояния ионосферы за несколько секунд. Для этого Булатовым в 1936 г. был предложен панорамный метод снятия высотно-частотных характеристик, при котором они последовательно получаются на экране осциллографа как изображение на экране телевизора. Панорамный метод применяется в настоящее время на всех современных ионосферных станциях.

С 1925 г. начал работу по изучению распространения коротких волн А. Н. Щукин. Сначала для наблюдения за распространением коротких волн он использовал простое приемное устройство. Впоследствии им была разработана оригинальная конструкция коротковолнового измерителя, пользуясь которым он впервые количественно измерил напряженность поля коротких радиоволн. Для изучения особенностей замираний на коротких волнах им применялось фотозаписывающее устройство. Проанализировав большое число измерений напряженности поля и эксплуатационные данные по прохождению коротких волн, А. Н. Щукин в 1932 г. публикует первый метод расчета напряженности поля в диапазоне коротких волн.

В результате большой работы, проведенной разными исследователями по изучению прохождения коротких радиоволн, А. Н. Казанцев построил карты ионизации слоя F_2 и других слоев для всего земного шара. В 1946 г. он предложил, а в 1956 г. усовершенствовал метод расчета напряженности поля по таким картам. Метод расчета А. Н. Казанцева в настоящее время широко применяется для расчета коротковолновых линий радиосвязи.

Экспериментальные исследования ионосферы в арктических районах и, в частности, на дрейфующих полярных станциях связаны с именем изобретателя и конструктора Ф. Я. Заборщикова, работающего в Арктическом и антарктическом институте в Ленинграде. Начиная с 1954 г., ведутся непрерывные наблюдения на ионосферной станции в обсерватории «Мирный» в Антарктиде.

Результаты экспериментальных исследований ионосферы послужили базой для теоретических исследований по ионосфере. Так, в 1930 г. независимо друг от друга советским ученым С. И. Крючковым и английским геофизиком Чепменом были сформулированы основы теории образования в ионосфере простого ионизированного слоя. Теоретическим исследованиям процессов в ионосфере посвящены также работы В. Л. Гинзбурга, С. М. Рытова, Я. Л. Альперта и др.

Дальнейшим шагом в исследовании ионосферы был Международный геофизический год (МГГ), проводившийся в течение 1957—1958 гг. в период максимальной солнечной активности, в котором Советский Союз принимал деятельное участие. Характерной особенностью исследований ионосферы в период МГГ было большое число стран, участвующих в этом мероприятии, а также согласованность в программах наблюдений и их объеме. Международный геофизический год был примером делового содружества ученых многих стран. В период МГГ получен огромный экспериментальный материал, обработка и анализ которого в ближайшие годы позволят глубже проникнуть в процессы, происходящие в ионосфере, и помогут овладеть их законами.

В период проведения МГГ во всех странах, и в том числе в СССР, были значительно расширены наблюдения за ионосферой с помощью ионосферных станций, сеть которых была значительно увеличена. Всего во время МГГ во всех странах мира велись наблюдения за ионосферой примерно на 160 ионосферных станциях.

Во время МГГ были организованы новые виды исследований ионосферы с помощью геофизических ракет и искусственных спутников Земли. Большое внимание было уделено организации измерений поглощения в ионосфере, исследований неоднородностей в ней и работам по возвратно-наклонному зондированию.

Ракетные исследования атмосферы в Советском Союзе были начаты еще в 1933 г., когда впервые была запущена исследовательская ракета. Применение разработанного советскими учеными метода отделяемого от ракеты контейнера позволило установить еще в 1951 г., что данные ракетных измерений давления воздуха, выполненные в США, приблизительно в 10 раз превышают действительные значения. Подобные ошибки объяснялись тем, что измерительная аппаратура во время измерений находилась в непосредственной близости от нагретой ракеты.

Особо большой размах ракетные исследования в верхней атмосфере приняли в период Международного геофизического года. Осуществляя программу МГГ, 21 февраля 1958 г. с территории европейской части СССР была запущена одноступенчатая геофизическая ракета, достигшая рекордной по тому времени высоты (473 *км*). В числе других важных измерений, проводимых с помощью ракеты, впервые было экспериментально измерено распределение электронной концентрации в ионосфере до высоты 473 *км*.

Большие перспективы экспериментального исследования ионосферы открылись после запуска искусственного спутника Земли (ИСЗ), произведенного впервые в Советском Союзе 4 октября 1957 г. Спутник был запущен во исполнение программы исследований МГГ. Уже первый полет спутника дал исключительные материалы по изучению ионосферы. Во время полета первого спутника была измерена плотность атмосферы по результатам наблюдений за уменьшением периода обращения спутника вследствие торможения земной атмосферой. При последующих запусках советских и американских спутников Земли и космических кораблей, запущенных в направлении Луны, были измерены интенсивность космического излучения, давление и состав атмосферы, а также ультрафиолетовое и корпускулярное излучения Солнца, распределение электронной концентрации ионосферы по высоте и некоторые другие.

Результатом экспериментальных исследований околоземного пространства было открытие трех радиационных поясов, расположенных примерно на высоте 1 600, 3 600 и 60 000 *км*. Открытие неизвестных ранее радиационных поясов Земли имеет большое значение, так как наличие в околоземном пространстве областей заряженных частиц, энергия которых измеряется сотнями тысяч и миллионами электронвольт, представляет большую опасность для космонавтов.

С запуском геофизических ракет, ИСЗ и космических ракет удалось установить, что ионосфера простирается вплоть до 20 000 *км*. Было обнаружено, что в ней отсутствуют резкие провалы ионизации между слоями E, D, F_1 и F_2, как это представляли раньше.

В 1946 г. Н. И. Кабанов, наблюдая за ионизированными следами метеоров, вторгающихся в земную атмосферу и сгорающих в ней, установил новое явление, названное впоследствии его именем. Им было обнаружено, что отраженные от ионосферы радиоволны, падая на земную поверхность, могут ею частично рассеиваться. Часть энергии рассеянной волны возвращается к источнику излучения и может быть обнаружена, например, на экране осциллографа. Открытие Кабанова привело к появлению нового вида радиолокации на коротких волнах, которую называют ионосферной радиолокацией. С ее помощью можно проводить наблюдения далеко за пределами горизонта. Например, за тысячи километров можно определять место атомного взрыва. Помимо ионосферной радиолокации, эффект Кабанова позволяет проводить возвратно-наклонное зондирование ионосферы и тем самым получать оперативные сведения о состоянии ионосферы на коротковолновой линии связи. Это позволяет повысить эффективность работы коротковолновой линии радиосвязи и уменьшить взаимное действие радиостанций.

О существовании в ионосфере неоднородностей указывали еще М. В. Шулейкин в 1923 г. и М. А. Бонч-Бруевич в 1933 г. Экспериментальные исследования ионосферных неоднородностей, особенно за последние 15 лет, привели к открытию явления распространения УКВ на расстояния, превышающие дальность прямой видимости, благодаря рассеянию радиоволн на этих неоднородностях. Характерная особенность таких линий радиосвязи заключается в исключительно высокой надежности их работы во время ионосферных возмущений и поглощений, когда радиосвязь на коротких волнах обычно прерывается. Это особенно важно для полярных районов, где ионосферные возмущения и поглощения — частые явления.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СТРОЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Основные физические свойства атмосферы, т. е. химический состав, плотность или давление и температура, определяются методами прямых и косвенных измерений.

К прямым методам относятся измерения: состава, давления и температуры атмосферы с помощью подъема стратостатов и шаров-зондов. В последние годы для этих целей стали применять приборы, установленные на геофизических ракетах и искусственных спутниках

Земли. С помощью шаров-зондов атмосфера изучена до высот порядка 40 *км*. Данные о строении атмосферы на больших высотах получают с помощью ракет и спутников Земли.

К косвенным методам относятся наблюдения за: полярными сияниями, свечением ночного неба, траекториями метеоров, распространением вертикально направленных радиоволн и др.

Совокупность всех применяемых методов исследования атмосферы позволила определить ее состав и строение.

Состав атмосферы. По данным наблюдений за атмосферой установлено, что приблизительно до высоты 100 *км* химический состав газов в ней приблизительно такой же, как и у поверхности

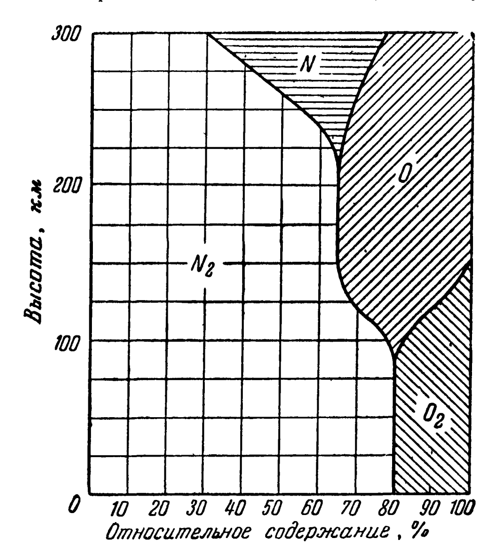


Рис. 1. Состав атмосферы на разных высотах.

Земли. Это объясняется тем, что нисходящие и восходящие воздушные течения, которые бывают на этих высотах, хорошо перемешивают атмосферу.

Сухой воздух на уровне моря содержит 78% молекулярного азота, 21% молекулярного кислорода и лишь около 1% легких газов (аргон, неон и др.).

Выше 100 *км* молекулы кислорода и азота под действием солнечных лучей, обладающих большой энергией, расщепляются (диссоциируются) на атомы. Поэтому в воздухе, помимо молекулярного кислорода и азота, имеются атомарный кислород и азот.

Кроме диссоциации, на высотах более 100 *км* происходит расслоение атмосферы. Более тяжелые газы, такие как кислород, располагаются в более низких слоях, а менее тяжелые, например азот, в более высоких слоях. Схематическая структура состава атмосферы показана на рис. 1.

Температура и давление атмосферы. Температура воздуха по мере увеличения высоты убывает. В среднем на каждый километр подъема температура понижается на 6° С. Происходит это потому, что воздух пропускает солнечные лучи и сам почти не нагревается. Основной поток солнечной энергии поглощается поверхностью Земли. Нагретая земная поверхность излучает тепловые лучи, которые и нагревают воздух. Поэтому слои воздуха, прилегающие к поверхности Земли, нагреваются сильнее.

Убывание температуры воздуха происходит приблизительно до высоты 10—12 *км*, где она падает примерно до минус 65° С. Но на высотах более 20 *км* она снова начинает возрастать. Это непонятное, на первый взгляд, явление объясняется процессами, связанными с присутствием озона, обладающего свойством поглощать энергию ультрафиолетового излучения Солнца. Поэтому скорость хаотического теплового движения молекул воздуха возрастает, т. е. увеличивается его температура.

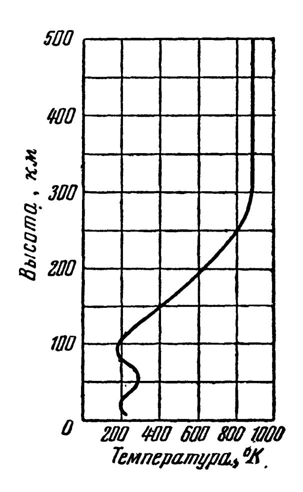


Рис. 2. Изменение температуры воздуха от высоты.

Более сильное возрастание температуры с высотой начинается приблизительно со 100 *км*. Во-первых, это обусловлено поглощением солнечного излучения при образовании ионизированной области, во-вторых, бомбардировкой молекул и атомов воздуха потоками микрометеоритов, которые, попадая в атмосферу, сгорают в ней.

На рис. 2 показана зависимость температуры воздуха от высоты, измеренная приборами, установленными на геофизических ракетах.

Ионизация и ее источники. Согласно современным представлениям атомы газов состоят из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. В нейтральных атомах заряд ядра компенсируется зарядом электронов.

Процесс ионизации заключается в отрывании одного или нескольких электронов от ядра. В результате электрическое равновесие в атоме нарушается и он приобретает один или несколько положительных зарядов, т. е. атом превращается в положительный ион. В нейтральных атомах электроны притягиваются к ядру. Чтобы оторвать электрон от ядра, необходимо затратить некоторую работу, называемую работой ионизации.

Один из способов ионизации газов заключается в так называемой фотоионизации. При этом молекулы и атомы газа подвергаются действию электромагнитных волн, например ультрафиолетовых лучей Солнца. Если энергия кванта волны превосходит энергию ионизации какого-либо газа, то происходит его ионизация, т. е. атом или молекула разбиваются на электрон и положительный ион. При ударной ионизации вырывание электрона из сферы притяжения ядра происходит в результате столкновения атома или молекулы газа с частицей, обладающей большой скоростью движения.

Основной источник ионизации атмосферы — Солнце. Оно излучает электромагнитные волны в очень большом диапазоне частот и выбрасывает потоки частиц. Из всего диапазона волн только ультрафиолетовые лучи обладают энергией, достаточной для ионизации газов атмосферы.

Ультрафиолетовое и корпускулярное излучения Солнца сильно поглощаются в верхних слоях атмосферы и не достигают поверхности Земли. Поэтому до последнего времени экспериментальное исследование ионизирующего излучения было чрезвычайно затруднено. Только в результате успешных запусков искусственных спутников Земли и космических ракет удалось измерить интенсивность ионизирующего излучения.

В настоящее время установлено, что основной источник ионизации заключается в ультрафиолетовом излучении. Интенсивность корпускулярного излучения составляет примерно половину интенсивности ультрафиолетовых лучей.

Следующий по степени важности источник ионизации — ультрафиолетовое излучение звезд. Ионизирующее действие звезд составляет примерно $^{1}/_{1000}$ действия солнечной радиации.

Источником ионизации служит также сгорание космической пыли, непрерывно вторгающейся в земную атмосферу. Размер пылинок составляет тысячные доли миллиметра, а число их, попадающее за сутки в атмосферу, достигает 10^{20}.

Помимо перечисленных постоянно действующих источников ионизации, существуют нерегулярные источники, т. е. действующие время от времени. Во-первых, это мощные потоки корпускул, выбрасываемые Солнцем в периоды солнечных извержений; попадая в земную атмосферу, они нарушают регулярное состояние ионосферы, вызывая ионосферные возмущения. Во-вторых, это потоки метеоров, пронизывающие атмосферу. Сгорая в ее плотных слоях, приблизительно на высоте 100 *км*, метеоры вызывают ионизацию окружающего воздуха.

Мерой ионизации служит количество свободных электронов в 1 *см*^{3}, и называется она электронной концентрацией.

Чтобы выяснить, как изменяется ионизация по высоте, предположим, что атмосфера в своем составе однородна и ее температура не меняется с высотой.

У верхней кромки атмосферы на высоте примерно 20 000 *км* ионизирующее излучение обладает наибольшей энергией. Все атомы воздуха будут ионизированы. Однако электронная концентрация там будет чрезвычайно малой, так как на этих высотах плотность атмосферы ничтожна. Таким образом, у кромки атмосферы не может быть наибольшего значения ионизации. У поверхности Земли ионизация также не может быть максимальной. Действительно, чтобы достигнуть поверхности Земли, ионизирующему излучению придется пройти всю толщу атмосферы. Энергия излучения при этом почти полностью поглотится атмосферой. Следовательно, максимальная ионизация будет на какой-то высоте над поверхностью Земли. В действительности атмосфера не однородна, а ее температура по высоте изменяется по сложному закону. Поэтому в реальной атмосфере ионизация по высоте изменяется также по сложному закону. Экспериментально установлено, что ионосфера имеет ступенчатый вид с плавным изменением ионизации от ступеньки

к ступеньке. Различают четыре области ионизации, называемые слоями E, D, F_1 и F_2.

На рис. 3 приведена зависимость изменения электронной концентрации от высоты. Из рисунка видно, что самый нижний слой D расположен на высоте 60—80 *км*, а самый высокий слой F_2, обладающий, кроме того, наибольшей электронной концентрацией,— на высоте 300—450 *км* в летнее время и на высоте 250—350 *км* в зимнее время.

Отражение радиоволн от ионосферы. До высоты примерно 60 *км* свободные электроны в атмосфере отсутствуют. С точки зрения электрических свойств атмосфера представляет собой диэлектрик, и радиоволны распространяются в ней по прямолинейной траектории, не испытывая поглощения. Как известно, свойства диэлектрика характеризуются диэлектрической проницаемостью, которая для воздуха приблизительно равна диэлектрической проницаемости вакуума.

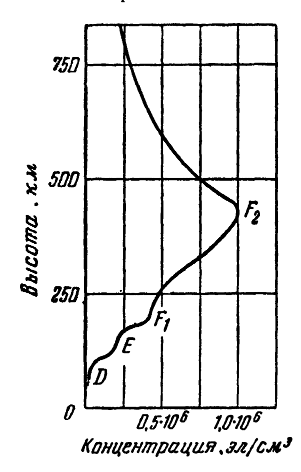


Рис. 3. Распределение электронной концентрации по высоте.

На больших высотах в ионизированных слоях атмосферы существуют свободные электроны. Под действием радиоволн они приводятся в колебательное движение, в процессе которого часть электронов сталкивается с молекулами газа, находившимися в беспорядочном тепловом движении. Вследствие подобных столкновений общее тепловое движение молекул усиливается, т. е. энергия радиоволн частично расходуется на тепловые потери. Таким образом, радиоволны при распространении в ионизированном газе испытывают поглощение.

С увеличением частоты поглощение радиоволн уменьшается. Действительно, из-за инерции массы электрона амплитуда его колебаний с возрастанием частоты будет уменьшаться, и, следовательно, вероятность столкновения колеблющегося электрона с близлежащими молекулами газа становится меньше. Поэтому на коротковолновых линиях связи, использующих отражение радиоволн от ионосферы, всегда стремятся работать на более высоких частотах.

Очевидно, что число столкновений колеблющихся электронов с молекулами газа будет больше в низких слоях ионосферы, где давление воздуха больше. В вышележащих ионизированных слоях, где атмосферное давление меньше, число столкновений уменьшается. Следовательно, количество электронов, находящихся в свободном колебательном движении, больше.

Электромагнитная энергия волны, затраченная на приведение свободных электронов в колебательное движение, в дальнейшем не расходуется, так как электроны не испытывают ни трения, ни столкновений. Подобным свойством обладают идеальные диэлектрики. Это доказывается математическим анализом процесса распространения радиоволн в ионизированном газе, где отсутствуют столкновения электронов с молекулами.

Рассмотрим процесс распространения радиоволн при их падении из воздуха в ионосферу (рис. 4).

Предположим, что ионосфера состоит из ряда плоских слоев, в пределах каждого из которых концентрация электронов остается постоянной. При этом в первом слое она меньше, чем во втором, во втором меньше, чем в третьем, и т. д.

Зная электронную концентрацию слоя N и частоту радиоволн f, можно определить показатель преломления ионизированного слоя по формуле

$$n = \sqrt{1 - 80{,}8 \frac{N}{f^2}}.$$

Из формулы видно, что в первом ионизированном слое показатель преломления меньше единицы. Радиоволна, падающая под углом φ_0 на ионосферу, переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду. В подобных условиях радиоволна испытывает преломление, причем угол преломления φ_1 больше угла падения φ_2.

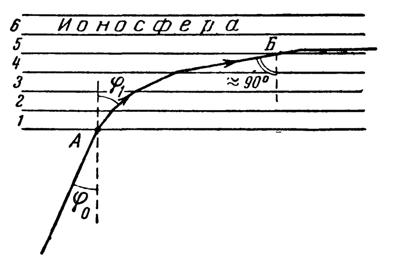


Рис. 4. Преломление радиоволн в слоистой ионосфере.

Преломление радиоволны будет происходить также при переходе из слоя *1* в слой *2* и т. д. Наконец, после нескольких преломлений угол падения радиоволны у какого-то слоя станет равным приблизительно 90°. Это значит, что в точке *Б* луч станет почти параллельным поверхности Земли. Положение луча в точке *Б* весьма неустойчиво. Достаточно малейшей неоднородности в ионосфере, вследствие которой луч хотя бы незначительно отклонится от направления параллельного слоя, чтобы дальше он начал все больше и больше приближаться к Земле, повторяя пройденный путь на участке между точками *А* и *Б*, но в обратном порядке. Наоборот, всякое случайное отклонение луча в точке *Б* вверх ликвидируется, и луч будет опять становиться параллельным Земле. В действительных условиях концентрация электронов меняется не скачком от слоя к слою, а непрерывно, поэтому непрерывно будут меняться показатель преломления и траектория движения волны.

Для данной электронной концентрации ионосферы существует максимальная частота, при которой радиоволны еще отражаются ионосферой. Радиоволны более высоких частот не могут отражаться от ионосферы, пронизывают ее и уходят в космическое пространство (рис. 5). Различают два вида максимальных частот: критическую частоту вертикального падения и максимальную частоту наклонного падения волны. Критической частотой для данного ионосферного слоя называют ту наибольшую частоту, при которой радиоволны, направленные вертикально, еще могут быть отражены ионосферой. В отличие от этого максимальной частотой называют ту наибольшую частоту, при которой радиоволны, направленные под

каким-то углом β к поверхности Земли, еще могут быть отражены ионосферой.

Если известна критическая частота ионосферного слоя $f_{кр}$, то максимальную частоту наклонного падения $f_{макс}$ можно определить по формуле

$$f_{макс} = f_{кр} \sqrt{\frac{1 + \frac{2h}{R}}{\sin^2 \beta + \frac{2h}{R}}},$$

где R — радиус земного шара, равный 6 370 *км*;

h — высота ионосферного слоя, от которого происходит отражение радиоволн.

Из числа регулярных слоев самую высокую максимальную частоту имеет слой F_2, который, как это видно из рис. 3, обладает также наибольшей электронной концентрацией.

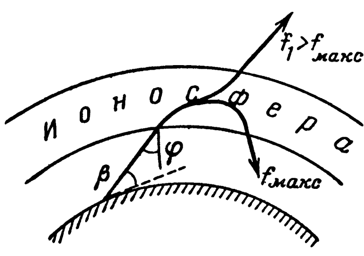


Рис. 5. Отражение радиоволн от ионосферы.

Суточные, сезонные и 11-летние изменения состояния ионосферы. Суточные изменения концентрации электронов в ионосфере примерно следуют за изменением высоты Солнца. Максимальная концентрация бывает тогда, когда Солнце занимает наивысшее положение. В соответствии с этим критическая частота имеет наибольшее значение в полдень летом и наименьшее значение ночью зимой. Этому правилу подчиняются критические частоты слоя E. На рис. 6 показаны графики суточных изменений критических частот слоев E и F_2 для зимы и для лета. Из рисунка видно, что в отличие от слоя E критические частоты слоя F_2 достигают наибольшего значения в зимние полуденные часы. Причина такого необычного поведения слоя F_2 до сих пор точно не установлена.

На рис. 7 показан ход полуденных критических частот за год для средних широт. Критические частоты слоев E и F_2 в летние месяцы больше, чем в зимние и осенние. Критическая частота слоя F_2 2 раза в течение года принимает наибольшее значение.

Помимо суточных и сезонных изменений, состояние ионосферы находится в зависимости от изменения солнечной активности. Во внешних слоях Солнца постоянно происходят интенсивные процессы, сопровождающиеся изменениями температуры его поверхности и изменениями корпускулярного и ультрафиолетового излучений. Эти изменения сопровождаются появлением на Солнце пятен, которые с помощью астрономических приборов могут быть подсчитаны. В результате непрерывных наблюдений за Солнцем, начиная с 1740 г. и по настоящее время, установлено, что количество пятен в год изменяется периодически с 11-летним периодом. Установлено также, что концентрация электронов, а следовательно, и критические частоты в слоях ионосферы изменяются пропорционально коли-

честву пятен на Солнце. Это хорошо видно на рис. 8, где приведены кривые изменения количества пятен на Солнце и критических частот слоя F_2 за период с 1933 по 1947 г. При увеличении количества пятен возрастают критические частоты. Убывание количества пятен сопровождается уменьшением критических частот.

Последний максимум солнечной активности был в 1958 г. Прошедший 1963 и настоящий 1964 г. приходятся на минимум солнеч-

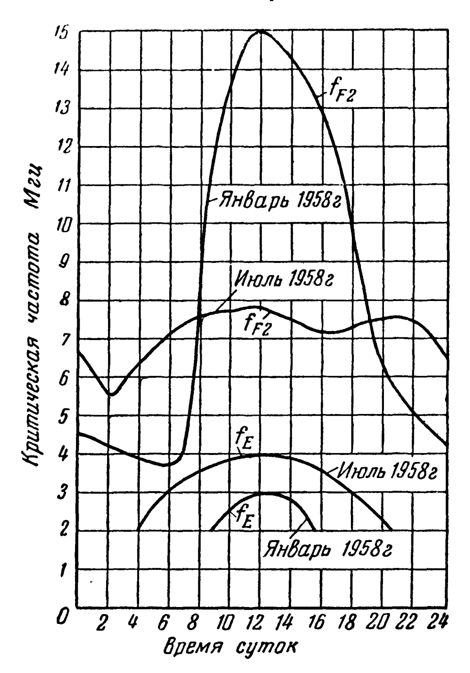


Рис. 6. Суточные изменения критических частот летом и зимой.

ной активности. Следовательно, радиолюбители в это время не должны ожидать хорошего «прохождения» коротких радиоволн на большие расстояния.

Помимо суточных, сезонных и 11-летних изменений состояния ионосферы, которые носят регулярный характер, в ионосфере происходят также нерегулярные процессы. К ним относятся: ионосферные возмущения, внезапные поглощения и образование спорадического слоя E_s.

Ионосферные возмущения. В результате вспышек на Солнце извергаются мощные потоки заряженных частиц. Попадая в земную атмосферу, эти частицы нарушают нормальное состояние ионосферы, особенно слоя F_2, и служат причиной ионосферных возмущений. Электронная концентрация слоя F_2 уменьшается, нарушается пра-

вильная структура слоя и появляются промежуточные, быстро меняющиеся слои в виде электронных скоплений. Это приводит к тому, что отражения от слоя F_2 исчезают. Ионосферные возмущения особенно сильно проявляются в полярных областях. Их длительность меняется от нескольких часов до 2 суток. Ионосферные

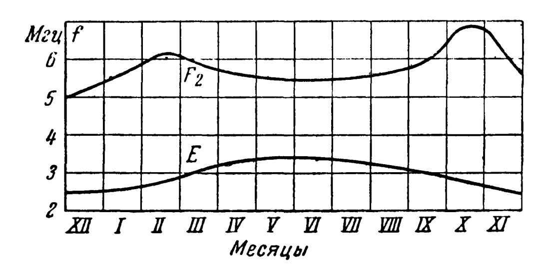


Рис. 7. Ход критических частот за год.

возмущения обычно сопровождаются полярными сияниями и резкими изменениями напряженности магнитного поля Земли.

Внезапные поглощения. Помимо корпускулярных извержений Солнца, время от времени на нем происходят вспышки ультрафиолетового излучения. Попадая в атмосферу, это излучение вызывает

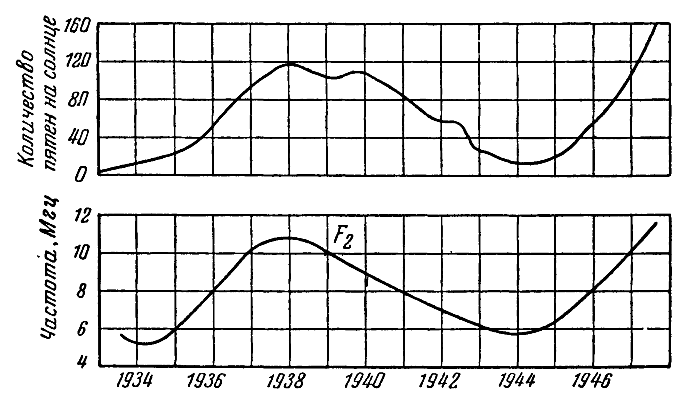


Рис. 8. Количество солнечных пятен и критические частоты слоя за период с 1933 по 1947 г.

сильную ионизацию в слоях E и D, что сопровождается увеличением поглощения коротких волн, в результате этого резко ухудшается их «прохождение». Явление внезапного поглощения длится от нескольких минут до 1 *ч* и может возникнуть только на освещенной половине Земли.

Спорадический слой E_s представляет собой скопление отдельных сильно ионизированных блоков, разделенных промежутками

слабо ионизированного газа. Такой «решетчатый» слой возникает на уровне слоя E и имеет протяженность десятков или сотен километров. Чаще всего слой E_s возникает летом в годы минимума солнечной активности.

Необходимо сказать, что структура слоя E_s и его поведение еще окончательно не установлены. Точно не установлены также причины его образования. Некоторые ученые объясняют появление спорадического слоя как следствие попадания потоков метеоров в атмосферу и их сгорания в ней.

Спорадический слой может быть как прозрачным, так и не прозрачным для коротких радиоволн. В первом случае он не нарушает работу коротковолновых линий связи. Во втором случае он обладает экранирующим действием и не пропускает короткие радиоволны. В этом случае он может оказаться серьезной помехой для радиосвязи.

Слой E_s может быть причиной распространения ультракоротких радиоволн на большие расстояния. Например, прием телевизионных программ от телецентров, расположенных за несколько тысяч километров, может объясняться отражением ультракоротких радиоволн от спорадического слоя. Следует отметить, что спорадический слой может быть одной из причин, объясняющей дальнее распространение УКВ. Другими причинами могут быть отражение УКВ от слоя F_2 в годы максимума солнечной активности и распространение УКВ в так называемых тропосферных волноводных каналах.

Процессы в ионосфере, особенно нерегулярные (кратковременные), изучают путем непрерывного наблюдения за состоянием ионосферы с помощью сети ионосферных станций.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИОНОСФЕРНАЯ СТАНЦИЯ

Изменения в ионосфере тесным образом связаны с другими геофизическими явлениями (изменениями ультрафиолетового и корпускулярного излучений Солнца, полярными сияниями и др.), поэтому ионосферу исследуют на геофизических обсерваториях, где наряду с наблюдениями за ее состоянием также непрерывно регистрируют изменения, или, как принято называть, вариации магнитного поля Земли, интенсивности излучения Солнца и др. В полярных районах наблюдают также за полярными сияниями.

Большое значение для изучения ионосферы имеют непрерывные наблюдения за периодическими изменениями солнечной деятельности, проводимые в астрономических обсерваториях. При изучении процессов в ионосфере и связанных с ними геофизических явлений большое значение имеет согласованность программы наблюдений. Она приобретает особо важную роль в период международных геофизических кампаний, когда наблюдения ведутся широким фронтом во многих странах мира. Большое значение в этом отношении имел прошедший Международный геофизический год. В настоящее время во многих странах мира, в том числе и в СССР, ведется большая подготовка к Международному году спокойного Солнца.

Современные магнитно-ионосферные обсерватории оборудованы автоматическими ионосферными станциями для непрерывного наблюдения за состоянием ионосферы, магнитными приборами (вариометрами) для регистрации поведения земного магнитного поля, аппаратурой для наклонного или наклонно-возвратного зондирования ионосферы, приборами для измерения поглощения в ионосфере, а также комплексом аппаратуры для измерения атмосферных помех.

Автоматическая ионосферная станция — основное средство для исследования ионосферы. Она представляет собой достаточно сложное радиотехническое устройство и по принципу действия напоминает радиолокационную станцию. С ее помощью можно определить критическую частоту вертикально направленной волны, а также высоту ионизированного слоя.

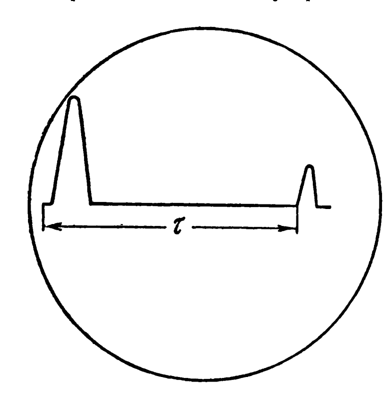


Рис. 9. Прямой и отраженный импульсы на экране электронно-лучевой трубки.

Ионосферная станция состоит из передатчика и приемника, расположенных рядом. Передатчик дает короткие радиоимпульсы, которые с помощью специальных антенн направляются вертикально вверх. Достигнув ионизированного слоя, радиоволны отражаются от него и, спустя некоторое время, возвращаются к приемнику станции. Так как радиоволны распространяются со скоростью, приблизительно равной скорости света, то для прохождения пути от ионосферной станции до ионизированного слоя и обратно радиоволне потребуется время τ. Промежуток времени между прямым и отраженным от ионосферы радиоимпульсами можно измерить на осциллографе. На рис. 9 схематически показано изображение, возникающее на экране осциллографа, основного и отраженного от ионосферы импульсов. Зная скорость движения светящегося пятна вдоль линии развертки, можно измерить время запаздывания принимаемого импульса.

Если считать, что скорость распространения радиоволны равна скорости света ($3 \cdot 10^5$ *км/сек*), то можно определить высоту ионизированного слоя h, от которого происходит отражение радиоволн, по формуле

$$h = \frac{\tau \cdot 3 \cdot 10^5}{2}, \text{ км.}$$

Необходимо оговориться, что скорость распространения радиоволн равна скорости света только в неионизированной части атмосферы (до высоты примерно 60 *км*). В ионосфере скорость их распространения меньше скорости света. В результате этого действительная высота точек отражения радиоволн от ионосферы будет меньше действующей высоты, определяемой по приведенной формуле.

Основные параметры ионосферной станции следующие: диапазон частот излучаемых радиоволн, длительность излучаемых импульсов и частота их повторения, мощность передатчика в импульсе и время, в течение которого изменяется настройка передатчика, пробегая весь диапазон частот ионосферной станции. Это время называется длительностью сеанса.

Современные ионосферные станции имеют следующие параметры: диапазон изменения частоты от 0,2 до 20 *Мгц*, длительность излучаемых импульсов примерно 100 *мксек*, частота повторения импульсов 50 *гц*, мощность передатчика в импульсе от 1 до 50 *квт*, длительность сеанса от 0,5 до 5 *мин*.

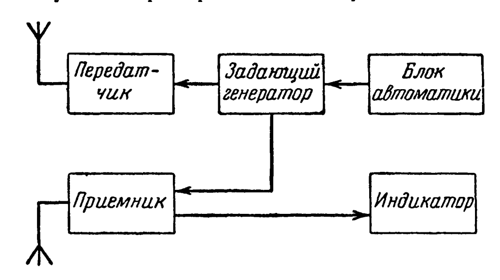


Рис. 10. Блок-схема автоматической ионосферной станции.

Принцип действия ионосферной станции поясняется блок-схемой, показанной на рис. 10.

Основным блоком служит задающий генератор. Он вырабатывает частоты, которые за время одного сеанса плавно изменяются в определенном диапазоне. Несущие частоты передатчика, также изменяющиеся в определенном диапазоне, модулируются импульсами длительностью примерно 100 *мксек*. Эти сигналы мощностью в импульсе около 20 *квт* подаются в передающую антенну, излучающую их вертикально вверх.

Отраженные от ионосферы импульсы попадают в приемную антенну и подаются в приемник с двойным преобразованием частоты. С выхода приемника сигнал поступает на индикаторы.

На станции имеются два индикатора. Один из них — по существу обычный осциллограф и служит для визуального определения высот, на которых происходит отражение радиоволн от ионосферы. Второй индикатор предназначен для получения высотно-частотных характеристик ионосферы. Этот индикатор имеет фоторегистрирующее устройство, которое фотографирует высотно-частотные характеристики на кинопленку.

Автоматическая работа станции обеспечивается блоком автоматики. По сигналам, поступающим с этого блока, происходит автоматическое включение питания отдельных блоков станции, фотографирование высотно-частотных характеристик, перемотка пленки в фоторегистрирующем устройстве и выключение станции. Управление работой блока происходит от электрических часов.

На ионосферных станциях применяют вертикальные ромбические или четырехугольные антенны. Для перекрытия диапазона час-

тот от 0,5 до 20 *Мгц* применяются две антенны. Обычно на станциях имеются два комплекта таких антенн — один для передачи, другой — для приема. Приемные и передающие антенны должны быть расположены взаимно перпендикулярно. В противном случае в момент работы передатчика в приемной антенне будет наводиться большой сигнал, мешающий приему отраженного сигнала.

В результате работы ионосферной станции получается высотно-частотная характеристика ионосферы. На рис. 11 приведена такая характеристика, полученная на автоматической ионосферной станции под Ленинградом. На высоте примерно 120 *км* находится слой E, критическая частота которого равна приблизительно 3,1 *Мгц*. Выше слоя E находятся слои F_1 и F_2 для так называемых «обыкновенных» и «необыкновенных» лучей.

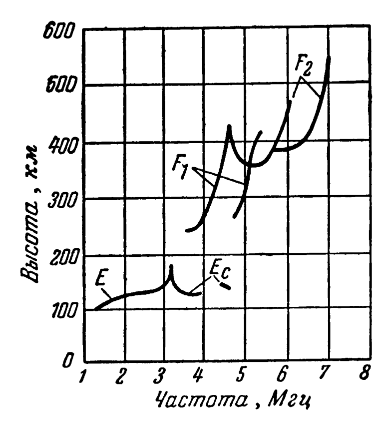


Рис. 11. Высотно-частотная характеристика.

Расщепление падающей на ионосферу радиоволны на обыкновенную и необыкновенную волны происходит благодаря влиянию магнитного поля Земли. При распространении радиоволн в присутствии магнитного поля Земли движение свободных электронов в ионосфере происходит не по прямолинейной, а по криволинейной траектории. Вследствие этого появляется дополнительная составляющая вектора скорости движения электронов, благодаря чему ионосфера приобретает свойство двойного лучепреломления. Аналогичным свойством обладает кристалл турмалина, при прохождении через который луч света расщепляется на два луча. Точно так же радиоволна при прохождении через ионосферу расщепляется на две волны: обыкновенную и необыкновенную.

Исключительно большое значение имеет согласованность в программе наблюдений за ионосферой на всех ионосферных станциях мира. В настоящее время на большинстве ионосферных станций мира высотно-частотные характеристики регистрируются в одно и то же время и по единой программе. Результаты наблюдений по всем ионосферным станциям в виде пленок с фотографиями высотно-частотных характеристик поступают в мировые центры сбора информации, один из которых находится в Москве.

Результаты ионосферных наблюдений в обсерваториях обрабатывают вручную под руководством научного сотрудника. Строят графики суточного хода критических частот и действующих высот ионосферных слов. По этим данным вычерчивают карты критических частот для всего земного шара. Эти данные в совокупности с наблюдениями за другими геофизическими явлениями позволяют овладеть законами этих явлений и поставить их на службу человеку.

Ручная обработка ионограмм отнимает много времени. Достаточно сказать, что на одной ионосферной станции обработкой их занимаются 3—4 квалифицированных специалиста. В последнее вре-

мя изыскивают пути автоматизации этого трудоемкого процесса Одним из возможных способов обработки ионограмм может быть применение электронных счетных машин. Однако сигналы ионосферных станций не могут быть непосредственно введены в электронную машину.

При машинной обработке ионограмм должны быть предусмотрены дополнительные меры по повышению помехозащищенности ионосферной станции. Выше упоминалось, что в современных ионосферных станциях предусмотрены меры защиты от воздействия как внутренних, так и внешних помех. Тем не менее помехи пока еще значительны. При ручной обработке ионограмм опытный специалист может отличить на фотопленке полезный сигнал от помехи, а машина может посчитать помеху за сигнал и выдать неправильные результаты.

Один из путей значительного улучшения помехозащищенности ионосферной станции состоит в использовании статистических свойств сигнала и помехи. Как правило, помехи носят случайный характер. Это свойство помех используется для повышения помехозащищенности. Например, можно накапливать информацию о сигнале на специальной электронно-лучевой трубке. При этом величина полезного сигнала будет сильно возрастать, в то время как величина случайных помех останется примерно без изменений.

Машинная обработка ионосферных данных весьма перспективна; по-видимому, в ближайшее время она найдет широкое применение.

Практическая ценность результатов работы ионосферных станций заключается в получении оперативных сведений о состоянии ионосферы. Эти данные необходимы, например, для более эффективной работы коротковолновых линий связи. В моменты ионосферных возмущений и поглощений, особенно часто бывающих в полярных районах, наступает резкое ухудшение, а порою и прекращение связи. Задача службы ионосферного наблюдения заключается в своевременном обнаружении таких явлений и предупреждении работников коротковолновых станций.

Результаты наблюдений за ионосферой с помощью ионосферных станций в совокупности с наблюдениями за другими геофизическими явлениями дают возможность организовать службу прогнозов состояния ионосферы. Такие прогнозы составляются вперед на несколько дней, месяцев и даже лет.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭФФЕКТ КАБАНОВА

В ноябре 1960 г. председатель Государственного комитета по делам изобретений при Совете Министров СССР вручил Н. И. Кабанову диплом открытия, суть которого в следующем: *Радиоволны, отраженные от ионосферы, при падении на землю частично рассеиваются ее поверхностью, при этом некоторая доля рассеянной энергии возвращается к источнику излучения, где и может быть зарегистрирована.* Этому открытию присвоено наименование эффекта Кабанова.

9 и 10 октября 1946 г. должно было наблюдаться очень редкое явление — метеорный дождь «Дракониды». Кроме обычных астрономических способов наблюдения за метеорами, возникла мысль использовать для этой цели радиолокацию. Сотрудники Астрономического института им. Штернберга обратились к Н. И. Кабанову с предложением организовать наблюдения за метеорным дождем с помощью радиолокационной станции. Это предложение несколько озадачило Н. И. Кабанова, так как в то время считали, что максимальная дальность действия радиолокационных станций не превышает 200 *км.* Ожидаемые размеры метеоров были намного меньше самолетов — распространенной цели радиолокационных станций. Следовательно, дальность действия локационной станции при наблюдении метеоров должна была быть намного меньше 200 *км.* Однако оказалось, что следы ионизированного газа, остающиеся за метеором, когда он пронизывает плотные слои атмосферы и сгорает в них, тянутся на многие километры и могут быть обнаружены с помощью радиолокационной станции.

Под руководством Н. И. Кабанова 9 и 10 октября были проведены такие наблюдения. Использование радиолокации для исследования метеоров было шагом вперед, так как никто до сих пор не проводил подобные эксперименты. Кроме того, было установлено, что метеорные следы могут быть обнаружены на расстоянии в несколько сотен, а в отдельных случаях до тысячи километров. Анализ результатов наблюдений показал, что метеорные следы рассеивают электромагнитную энергию, поступающую от радиолокационной станции. Часть этой энергии возвращается назад к станции, где и регистрируется в виде сигнала. Это обстоятельство навело Н. И. Кабанова на мысль, что рассеивать сигналы может и поверхность Земли, когда на нее падают радиоволны. Следовательно, часть энергии рассеянной волны может возвратиться к передатчику и там быть зарегистрирована. Эта гипотеза противоречила взглядам на распространение радиоволн, господствовавшим в то время.

Вопрос о том, рассеивает земная поверхность радиоволны или нет, был поставлен задолго до Н. И. Кабанова. Со времени начала работы коротковолновых линий радиосвязи (примерно с 1926 г.) наблюдались некоторые явления, которые ученые не в состоянии были объяснить. Например, иногда регистрировались случаи, когда прием сигналов мощных коротковолновых радиостанций происходил в мертвой зоне, т. е. в зоне, в которую обычно не попадали отраженные от ионосферы сигналы. Принимаемый в мертвой зоне сигнал обычно сопровождался искажениями. Они проявлялись в виде «ворчания» радиотелефона или ошибок радиопеленгатора, принимавшего одновременно как прямой, так и рассеянный сигналы. Для выяснения причин этих непонятных явлений были организованы большие экспериментальные работы, особенно в Англии. В результате этих исследований на протяжении 1932—1940 гг. группа сотрудников под руководством Т. Эккерслея установила, что короткие радиоволны в процессе своего распространения испытывают рассеяние.

Объясняя это явление, Т. Эккерслей утверждал, что причина рассеяния радиоволн — нижний слой ионосферы. Если же и есть рассеяние, вызванное Землей, то его практически обнаружить невозможно. Этот ошибочный взгляд Т. Эккерслея был опубликован в 1940 г. в его книге «Анализ рассеянных отражений, наблюдавших-

ся при радиосвязи». Этот взгляд господствовал в научных кругах Запада, поэтому Н. И. Кабанов отдавал себе отчет, в какое противоречие он вступает с представлениями Т. Эккерслея. Тем не менее он решил экспериментально проверить свою гипотезу, что и удалось ему в 1947 г.

На экране локатора им были обнаружены сигналы. Но это не были сигналы, отраженные летящим самолетом, метеорами и ионосферой. Анализ и расчеты с достоверностью показали правильность предположения ученого. Локатор, работавший на самых высоких частотах коротковолнового диапазона, принял сигналы, отраженные

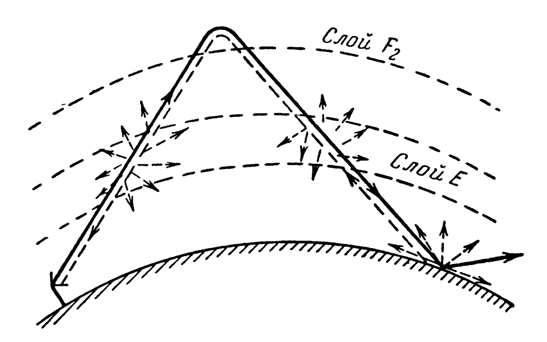


Рис. 12. Рисунок, поясняющий эффект Кабанова.

поверхностью Земли в двух с лишним тысячах километров от передатчика. В последующие годы эти эксперименты тщательно проверялись. Их результатом был доклад Н. И. Кабанова, сделанный советской делегацией в 1959 г. в США на IX пленарной ассамблее Международного консультативного комитета по радио (МККР). Из доклада было ясно, что методом Н. И. Кабанова можно обнаруживать и определять местонахождение самых различных процессов, явлений и предметов на сверхдальних расстояниях, в любой точке земного шара.

Необходимо отметить, что аналогичные выводы о рассеянии радиовол поверхностью Земли были получены за рубежом на 3 года позже.

Объяснение эффекта Кабанова схематически показано на рис. 12. Отражение коротких радиоволн от ионосферы происходит в области F_2. Попадая на земную поверхность, волна отражается от нее по закону «угол падения равен углу отражения». Кроме того, в месте падения волны происходит ее рассеяние во все стороны, а также и в направлении прихода волны. Эта рассеянная часть радиоволны возвращается к передатчику, где и регистрируется на экране осциллографа.

Как показали исследования, величина рассеянного поля определяется свойствами поверхности Земли. Она будет больше на поверхности с резко выраженной электрической неоднородностью, например от берега моря, а также, если имеются резкие изменения рельефа местности (горы). Передатчик мощностью в несколько киловатт

создает в пункте приема рассеянное от поверхности земли поле, напряженность которого составляет примерно несколько микровольт на метр. Помимо рассеяния земной поверхностью, на пути распространения радиоволн происходит также рассеяние в слое E, который дважды пересекается падающей радиоволной. Однако, как показали измерения, рассеяние от слоя E намного меньше рассеяния от земной поверхности.

На рис. 13 показаны импульсные сигналы, наблюдавшиеся на экране осциллографа во время эксперимента, проведенного Н. И. Кабановым 19 декабря 1949 г. Передатчик был установлен в Москве.

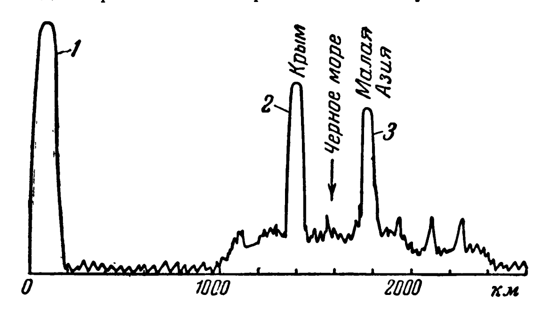


Рис. 13. Отражение радиоволн от берегов Черного моря.

Радиолокация проводилась в направлении к Черному морю. Первый импульс, расположенный в левой части рисунка, соответствует моменту импульсного излучения радиолокационной станции, работавшей на частоте 16,2 *Мгц*. Второй импульс появился в результате прихода рассеянного сигнала от берега Черного моря (Крым), а третий импульс — от другого берега Черного моря в районе Малой Азии (1 750 *км*). Между вторым и третьим импульсами имеется резко выраженный провал, соответствующий ровной поверхности Черного моря.

Подобная радиолокация территории происходит за одно отражение сигнала от ионосферы. В этом случае говорят об односкачковом распространении коротких радиоволн. При односкачковом распространении можно осуществить радиолокацию на расстоянии до 4 000 *км*. Радиолокация на более дальние расстояния проводится путем двух- и трехскачкового распространения радиоволн.

Приведенный пример радиолокации района Черного моря показывает, что с помощью эффекта Кабанова можно проводить радиолокацию на сверхдальние расстояния практически любой точки земного шара. Это имеет большой научный и практический интерес. Например, с помощью «радиоэха Кабанова», как иногда называют это явление, можно обследовать большие пространства земной поверхности за короткое время. С его помощью можно регистрировать извержения вулканов, обнаруживать и наблюдать движение больших айсбергов и т. п.

Эффект Кабанова имеет исключительно большое значение для радиосвязи на коротких волнах. На нем основан метод возвратно-

наклонного зондирования ионосферы (сокращенно ВНЗ), который позволяет значительно повысить устойчивость радиосвязи и радиовещания на коротких волнах. Метод ВНЗ позволяет получить истинную картину состояния ионосферы и условий распространения радиоволн в данный момент времени в заданном направлении. С его помощью можно контролировать прохождение радиоволн и корректировать рабочие частоты на действующих линиях связи.

Идея метода ВНЗ аналогична эффекту Кабанова. Радиоволны, посылаемые передающей станцией, отржаясь от ионосферы, падают на Землю. Некоторые волны, рассеянные земной поверхностью, воз-

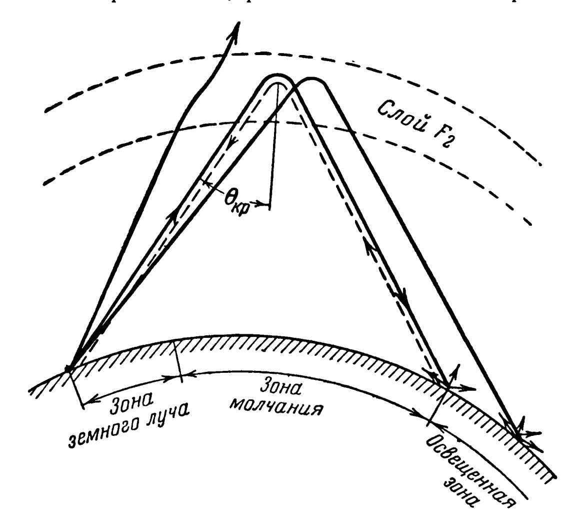


Рис. 14. Определение зоны молчания при возвратно-наклонном зондировании ионосферы.

вращаются назад к передающей станции с запаздыванием по времени, где регистрируются осциллографом. Осциллограммы возвратных рассеянных сигналов аналогичны приведенной на рис. 13.

Схема пространственного распространения радиоволн показана на рис. 14. Радиоволны, падающие на отражающий слой под углами, меньшими, чем критический угол $\Theta_{кр}$, не отражаются ионосферой. Лучи, имеющие угол больше критического, создают освещенную зону (зону приема). Между передатчиком и освещенной зоной находится зона молчания, т. е. поверхность, на которую не падают прямые лучи.

Передняя граница рассеянного сигнала соответствует началу освещенной зоны. Следовательно, зная время запаздывания рассеянного сигнала, можно найти ближайшую границу освещенной зоны и определить, насколько данная частота пригодна для радиосвязи с заданным приемным пунктом. Например, пусть время запаздывания рассеянного сигнала равно 10 *мсек*. Так как скорость распро-

странения волны составляет 300 000 *км/сек*, то двойной путь, пройденный сигналом, будет равен:

$$2D = 3 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 3\,000 \text{ км},$$

откуда

$$D = \frac{3\,000}{2} = 1\,500 \text{ км},$$

т. е. протяженность зоны молчания составляет 1 500 *км*.

Таким образом, зная время запаздывания рассеянного сигнала, можно определить размеры зоны молчания. Однако зондирование на одной частоте в некоторых случаях не дает нужных результатов. Рассеянные сигналы часто имеют очень сложный характер, и их трудно анализировать.

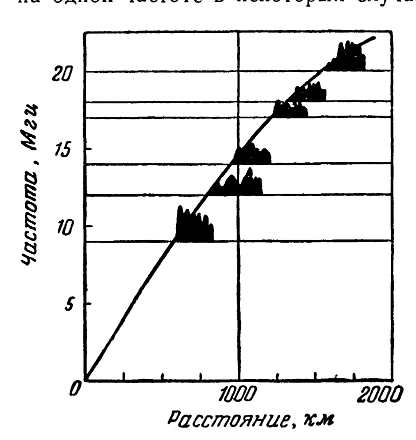


Рис. 15. Дистанционно-частотная характеристика при возвратно-наклонном зондировании ионосферы.

На сигналы, рассеянные земной поверхностью, накладываются сигналы, рассеянные от неоднородностей ионосферы. В результате принимаемый сигнал теряет четкие очертания своей формы, что затрудняет определение границ мертвой зоны.

В таких случаях зондируют ионосферу не на одной, а на нескольких частотах. Если сгруппировать затем последовательно осциллограммы рассеянных сигналов, то можно получить определенную частотную зависимость верхнего предела диапазона рабочих частот от расстояния. Такую зависимость называют дистанционно-частотной характеристикой (ДЧХ). На рис. 15 приведена ДЧХ для случая, когда зондирование проводилось на частотах 9, 12, 14, 17, 18 и 20 *Мгц*. Наблюдавшиеся возвратные рассеянные сигналы нанесены на график в возрастающем порядке. Линия, которая проходит через начало групп рассеянных сигналов, представляет собой дистанционно-частотную характеристику.

Для оперативного использования результатов возвратно-наклонного зондирования необходимо ДЧХ вычерчивать отдельно. Рабочие частоты по ДЧХ для коротковолновой линии связи необходимо выбирать так, чтобы корреспондент находился несколько дальше границы освещенной области. Если корреспондент находится на ее границе, то прием сигналов будет сопровождаться большими замираниями. Если же он будет расположен ближе границы, то прием будет отсутствовать.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ И «ВЕТРОВ» В ИОНОСФЕРЕ

Выше уже говорилось, что в процессе распространения радиоволн в ионосфере они испытывают поглощение. Физически поглощение объясняется столкновением колеблющихся электронов с более тяжелыми молекулами и ионами газа. В результате радиоволна теряет часть своей энергии на тепловое движение молекул. Математический анализ явления поглощения приводит к тому, что ионосферу можно представлять как среду, обладающую некоторой проводимостью. Оказывается, что при некоторых предположениях величина удельной проводимости прямо пропорциональна числу столкновений электронов с молекулами или ионами и обратно пропорциональна квадрату частоты радиоволны. Исследования показали, что наибольшее поглощение радиоволн происходит в нижних (D и E) областях ионосферы. Объясняется это тем, что в более низких слоях ионосферы плотность воздуха больше, т. е. количество молекул в каждом кубическом сантиметре воздуха больше. Поэтому вероятность столкновения электронов с молекулами, а следовательно, и поглощение возрастают.

Поглощение радиоволн в ионосфере сильно влияет на работу коротковолновых линий связи, поэтому при их проектировании всегда стремятся к таким условиям, чтобы поглощение было минимально возможным. Тогда при малой мощности передатчика можно получить хорошую радиосвязь на очень больших расстояниях. Для этого всегда стремятся работать на максимально возможной частоте. Однако в моменты возмущений в ионосфере наблюдается иногда резкое увеличение поглощения, ведущее к прекращению радиосвязи. Часто в такие моменты обслуживающий персонал радиостанций ошибочно предполагает, что нарушение связи произошло из-за неисправности аппаратуры.

Очевидно, что изучение процессов, происходящих в ионосфере и влияющих на поглощение, имеет важное практическое значение.

Один из методов изучения поглощения радиоволн в ионосфере — наблюдение за величиной амплитуды отраженного от ионосферы сигнала при помощи станции вертикального зондирования. Ионосферная станция снабжается соответствующими приставками, позволяющими регистрировать отраженные от ионосферы импульсы. Измерения ведут круглосуточно на одной или нескольких фиксированных частотах при одинаковой мощности передатчика и чувствительности приемного устройства.

Этот метод измерения обладает значительными недостатками. Во-первых, он дает возможность измерить лишь среднее значение поглощения для всей трассы радиоволн в ионосфере. Во-вторых, с его помощью можно получить сведения лишь о нижней «половине» ионосферы, т. е. только до высоты максимума слоя F_2, от которого происходит отражение радиоволн. Измерить поглощение радиоволн ионосферой, расположенной выше максимума слоя F_2, этот метод не позволяет.

Другой метод измерения поглощения — использование радиоизлучения Галактики. Благодаря успехам радиоастрономии в по-

следние годы были обнаружены и изучены источники космического радиоизлучения. Установлено исключительное постоянство радиоизлучения, приходящего из Галактики, которое используют для измерения поглощения радиоволн в ионосфере.

На рис. 16 приведена блок-схема установки для измерения поглощения. Антенну типа «волновой канал» направляют на центр Галактики, где имеется максимальное радиоизлучение. От антенны сигнал поступает в приемник с узкой полосой пропускания и очень большой чувствительностью. Продетектированные сигналы подаются на самописец, записывающий их на ленту. О поглощении радиоволн

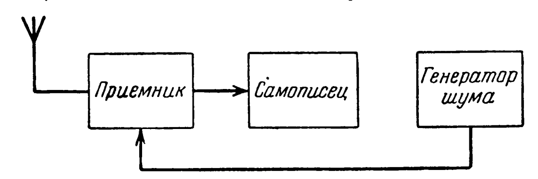


Рис. 16. Блок-схема установки для измерения поглощения в ионосфере.

в ионосфере судят по записям сигнала на ленте самописца. В моменты сильного возрастания поглощения наблюдаются резкие уменьшения амплитуды сигнала.

При измерениях усиление приемника все время остается постоянным. Для контроля за коэффициентом усиления приемника используют генератор шума, выполненный на шумовом диоде, позволяющий поддерживать постоянный уровень шумов в широком спектре частот. Время от времени приемник калибруют по шумовому генератору. Для этого приемная антенна отключается и на вход приемника подается сигнал от шумового генератора. Амплитуда шумового сигнала на выходе приемника всегда должна оставаться постоянной.

Этим методом измеряют поглощение на частотах метрового диапазона радиоволн. Объясняется это тем, что эти частоты не отражаются ионосферой и проходят сквозь нее. Более высокие частоты использовать нельзя, так как собственный уровень шумов приемника на этих частотах становится выше уровня космического радиоизлучения. Этот способ измерения поглощения, как и предыдущий, позволяет определять среднее значение поглощения для всей толщи ионосферы.

В последние годы число столкновений электронов с молекулами, а следовательно, и поглощение стали измерять прямыми методами с помощью аппаратуры, установленной на ракетах. Получены экспериментальные данные об изменении числа столкновений до высоты примерно 80 *км*. Существующая измерительная аппаратура оказывается недостаточно чувствительной, чтобы определить число столкновений на больших высотах, так как с увеличением высоты резко уменьшается число столкновений.

Кроме поглощения, на распространение радиоволн оказывают заметное влияние неоднородности в ионосфере в виде отдельных образований с повышенной электронной концентрацией. Часто их называют электронными облаками. Они могут иметь разные размеры, различную концентрацию электронов и различное распределение

электронной концентрации в пределах облака, а поэтому и различно воздействуют на проходящие через них сигналы.

В результате исследований неоднородностей было установлено, что в ионосфере могут появляться неоднородные образования больших размеров в виде спорадических слоев. Размеры этих образований значительно превосходят длину радиоволны, распространяющейся в ионосфере. Помимо крупных неоднородностей, в ионосфере почти всегда существуют мелкие неоднородности. Они всегда находятся в состоянии быстрых изменений, так как продолжительность существования каждой из них мала. Такие облака быстро распадаются благодаря диффузии газов, которая проявляется тем сильнее, чем больше высота.

При отражении радиоволн от ионосферы на основную волну, отраженную от ионосферы, накладываются дополнительные волны, которые образуются в результате рассеяния их на электронных облаках. Так как последние непрерывно изменяются, то фазы и амплитуды рассеянных сигналов в месте расположения приемных антенн будут также непрерывно изменяться. Результирующее поле в месте приема будет определяться как геометрическая сумма вектора напряженности поля основной волны и векторов напряженности поля дополнительных, рассеянных волн. Следовательно, при движении электронного облака амплитуда результирующего сигнала в приемной антенне будет меняться, принимая максимальные и минимальные значения. Говорят, что имеются замирания принимаемого сигнала. На экране осциллографа в этом случае можно увидеть непрерывные изменения амплитуды результирующего сигнала.

Замирания сигнала из-за ионосферных неоднородностей называют иногда дифракционными замираниями. Они отличаются от поляризованных замираний, которые появляются в результате непрерывных изменений поляризации радиоволн при их отражении от ионосферы.

Оказывается, что скорость перемещения электронных облаков, или «ветер» в ионосфере, находится в непосредственной связи с характером дифракционных замираний. Анализируя статистические свойства дифракционных замираний, можно определить скорость «ветра» в ионосфере.

На рис. 17 показано распространение радиоволн при неоднородностях в ионосфере. Помимо сигнала, отраженного от слоя F_2 (сплошная линия), в пункт приема *Б* приходят сигналы, отраженные неоднородностями (штриховые линии). При перемещении неоднородностей изменяется длина пути отраженного от неоднородности сигнала. При этом меняются фаза сигнала и амплитуда результирующего поля в точке приема.

Появление в ионосфере неоднородностей сопровождается характерными искажениями импульсных сигналов. Эти искажения проявляются в изменении ширины импульса. Передаваемый импульсный сигнал получает расплывчатую форму. Объясняется это тем, что сигналы, отраженные от неоднородностей, оказываются сдвинутыми по времени относительно прямого, так как длина пути этих сигналов разная.

О причинах образования в ионосфере крупных неоднородностей пока нет единого мнения. Некоторые исследователи считают, что образование неоднородностей в виде облаков происходит во время заката Солнца, в моменты появления спорадического слоя E_s, а так-

же во время усиленной грозовой деятельности. Во время захода Солнца в слое E происходит резкое уменьшение электронной концентрации. Полагают, что в слое E при быстром уменьшении интенсивности ионизации возникают нестационарные процессы, приводящие к возникновению неодородных участков электронной концентрации слоя, т. е. к электронным облакам. Подобные условия возникают и при затмении Солнца.

При усиленной грозовой деятельности электрические поля грозовых туч вызывают ионизацию на уровне слоя E. Это ведет к образованию местных спорадических образований в виде электронных

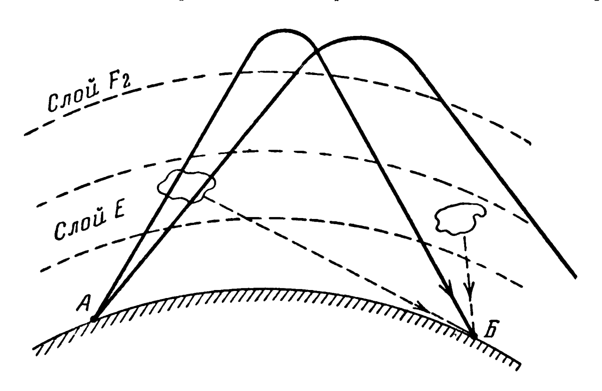


Рис. 17. Распространение радиоволн при неоднородностях в ионосфере.

облаков. Высказывается мнение, что в образовании неоднородностей в слое E может участвовать также и метеорная пыль, попадающая в ионосферу.

Одним из методов исследования неоднородностей является измерение частотного распределения замираний амплитуд отраженных от ионосферы сигналов. Анализ результатов таких измерений позволяет определить пространственные размеры неоднородностей по высоте. Такие измерения можно проводить при помощи описанной ионосферной станции вертикального зондирования. С помощью специального приспособления на такой станции записывают амплитуды отраженных от ионосферы импульсов в течение короткого времени, например 10 *мин*. Одновременно проводят зондирование ионосферы импульсами двух или трех различных частот. Отраженные сигналы для разных частот записывают на одной и той же ленте самописца. Предполагается, что в процессе измерений состояние ионосферы не меняется.

Если на трассе распространения волны попадаются неоднородности, то поле, рассеянное этими неоднородностями, изменяет величину сигнала, отраженного от ионосферного слоя. Очевидно, для радиоволн разных частот одна и та же неоднородность будет создавать разное рассеянное поле и величина сигнала для разных частот будет разная. Анализируя статистические свойства сигналов

двух разных частот, можно сделать вывод о размерах неоднородностей.

Как показали исследования, в период спокойного состояния ионосферы в ней преобладают неоднородности, средние вертикальные размеры которых находятся в пределах от 100 до 700 *м*. Аналогичные измерения горизонтальных размеров позволили установить, что их средняя величина колеблется от 100 до 1 000 *м*.

Для измерения направления «ветров» в ионосфере отраженные от нее сигналы принимают на три разнесенные антенны. На рис. 18 показан пример расположения антенн по сторонам равнобедренного прямоугольного треугольника. Длина каждого катета составляет 190 *м*. Один из катетов расположен в направлении север — юг. Сигналы от каждой антенны поступают на электронный переключатель станции, блок-схема которой показана на рис. 19,*а*. Переключатель со скоростью $^1/_{50}$ *сек* подключает каждую из приемных антенн ко входу приемника, с выхода которого сигналы подаются на самописец для записи всех трех сигналов на одну ленту. Образец такой записи показан на рис. 19,*б*.

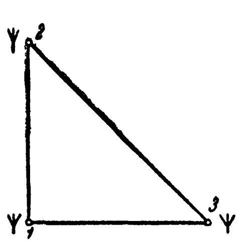


Рис. 18. Схема расположения антенн для измерения «ветров» в ионосфере.

На верхней части записи даны кривые изменения амплитуд сигналов, принятых на две антенны, расположенные в направлении север — юг. На нижней части записи приведена кривая изменения амплитуды сигнала, принятого на третью антенну. Из рисунка видно, что формы всех кривых подобны друг другу. Однако кривая *1* с записью сигнала от антенны *1* (рис. 18) сдвинута относительно кри-

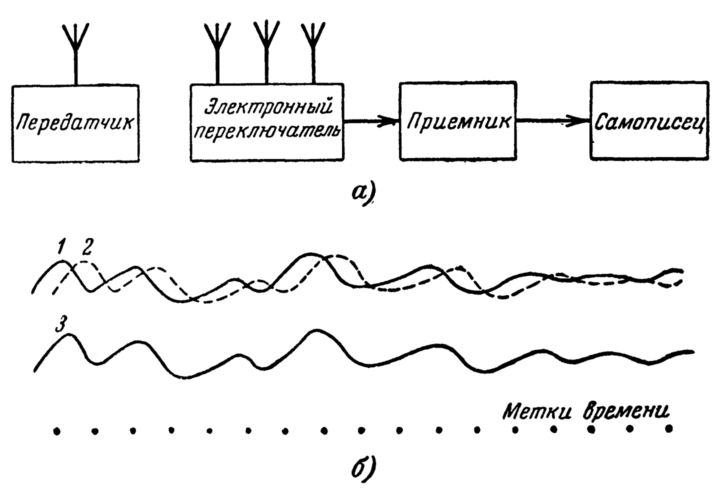


Рис. 19. Блок-схема аппаратуры для измерения «ветров» в ионосфере (*а*) и образец записи принимаемых сигналов (*б*).

вой 2. О величине сдвига можно судить по меткам времени, которые показаны в нижней части рисунка. Каждая метка наносилась через 2 *сек*. Следовательно, величина временно́го сдвига кривой *1* по отношению к кривой *2* составляет примерно 1 *сек*, т. е. в антенне *2* сигнал принимался на 1 *сек* раньше, чем в антенне *1*. Так как расстояние между антеннами равно 190 *м*, то скорость перемещения неоднородностей в ионосфере равна 95 *м/сек*. При этом направление движения происходит с севера на юг.

В результате исследования «ветров» установлено, что в области *E* скорость «ветра» изменяется от 30 до 150 *м/сек*. Установлено также, что в области *E* скорость увеличивается на 3 *м/сек* с увеличением высоты на 1 *км*. Были обнаружены также приливы солнечного и лунного происхождения. Во время приливов скорость «ветра» может изменяться на 25—35 *м/сек*. Неоднородности могут перемещаться в разных направлениях, однако с запада на восток или в обратном направлении они перемещаются чаще.

В области F_2 скорости «ветра» в ионосфере достигают 300—500 *м/сек*. Обнаружено, что скорости зависят от магнитной активности поля Земли и мало изменяются с высотой. Влияние приливных движений в этой области не установлено, а направление движения и скорости имеют некоторый суточный и сезонный характер.

В ионосфере часто встречаются не только очень крупные неоднородности размерами 2—10 *км* и даже 300—500 *км*, но также и очень малые. Последние имеют вихревое происхождение и служат источником рассеяния ультракоротких радиоволн на высотах 60—80 *км* над поверхностью Земли. Явление рассеяния УКВ на неоднородностях нижних слоев ионосферы используется для создания линий дальней радиосвязи на УКВ.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ РАКЕТАМИ И ИСКУССТВЕННЫМИ СПУТНИКАМИ ЗЕМЛИ

Исследования ионосферы с помощью ионосферных станций вертикального и возратно-наклонного зондирования, устройств по изучению ионосферного поглощения и «ветров» в ионосфере и т. п. относятся к методам косвенных измерений и не могут заменить прямые методы измерений с помощью приборов, установленных на летательных аппаратах.

До появления геофизических ракет и искусственных спутников Земли плотность атмосферы измеряли с помощью небольших воздушных шаров (шаров-зондов), которые могли подниматься до высоты примерно 40 *км*. На шарах-зондах устанавливали манометр-анероид. По мере подъема вверх и уменьшения давления верхняя крышка анероида изгибалась и перемещала прикрепленный к ней рычаг. При помощи небольшого передатчика показания анероида передавались на наземную станцию. Однако анероид может работать только на небольших высотах.

В последние годы исследователи получили новое оружие для изучения ионосферы — геофизические ракеты, способные подни-

маться вертикально вверх на несколько сотен километров. Для измерения давлений воздуха на таких больших высотах необходимо было применить тепловой манометр, который позволял измерять атмосферное давление до высот примерно 100 *км*. Выше 100 *км* давление измерялось с помощью ионизационного манометра, состоящего из нити накала, такой же, как и в обычной радиолампе, и анода. В ионизационном манометре ток, протекающий между нитью накала и анодом, изменяется в зависимости от плотности воздуха. Эти слабые изменения тока усиливаются и затем передаются по радиотелеметрической системе на Землю. Однако на показания такого манометра сильное влияние оказывал газ, выделявшийся в результате работы двигателей ракеты. Так как весь полет ракеты продолжается всего несколько минут, то этот газ не успевал рассеяться. Кроме того, скорость движения ракеты, как правило, превышает скорость звука. Все это очень усложняло обработку результатов измерений и уменьшало надежность результатов измерений. Более надежные результаты получаются при отделении контейнера с научной аппаратурой от самой ракеты. Этот метод был применен в СССР при запусках мощных геофизических ракет в 1958 г. до высоты 473 *км*.

В 1957 г. в СССР был запущен первый, а позднее второй и третий искусственные спутники Земли (ИСЗ). Изучение движения спутников давало уже возможность определить плотность атмосферы до высоты 700 *км*. Несмотря на большую разреженность атмосферы на таких высотах, она все же значительно тормозит спутник, в результате чего его орбита изменяется. В начале запуска эллиптическая орбита спутника по мере его торможения превращается в круговую. Попадая в плотные слои атмосферы, спутник сгорает.

Наблюдения за изменением орбит спутников позволили получить данные о плотности атмосферы на больших высотах. Вычисленная плотность неожиданно оказалась во много раз больше, чем считалось ранее. Выяснилось также, что плотность атмосферы не остается постоянной, а зависит от времени суток и от процессов, происходящих на Солнце. Данный способ позволял определить лишь среднюю плотность атмосферы за несколько оборотов спутника.

Плотность атмосферы измеряли также ионизационными манометрами, установленными на спутниках. Надежные результаты были получены при полетах третьего ИСЗ и примерно совпали с данными, полученными путем наблюдения за торможением спутника.

Для определения давления атмосферы в конкретной точке над поверхностью Земли был использован метод диффузии паров натрия. С этой целью на высоте 430 *км* с высотной геофизической ракеты было выпущено облако паров натрия. В результате столкновения с атомами воздуха облако паров натрия постепенно расширялось. Наблюдая за скоростью расширения облака, удалось определить плотность атмосферы на этой высоте.

Результаты измерений плотности атмосферы до высоты 1 000 *км*, полученные с помощью геофизических ракет и ИСЗ, приведены на рис. 20. Плотность атмосферы приведена в атомах на кубический сантиметр. Кривая, приведенная на рис. 20, получена в результате измерений в средних широтах. Очевидно, что для полярных и экваториальных широт могут быть отклонения от приведенной кривой.

Непосредственные измерения концентрации электронов и ионов в ионосфере проводились при вертикальных запусках геофизических ракет Академии наук СССР, на третьем ИСЗ, а также на первой,

второй и третьей космических ракетах. Измерения состояли из определения концентрации заряженных частиц ионосферы на высотах, которые были достаточно точно известны.

В результате указанных экспериментов удалось построить примерную структуру распределения по высоте концентрации заряженных частиц ионосферы и определить ее границу.

До высот примерно 450—470 *км* измерение концентрации электронов с помощью вертикально запускаемых геофизических ракет было осуществлено в СССР 21 февраля, 27 августа и 31 октября 1958 г. Измерения проводились путем наблюдения из нескольких пунктов на поверхности Земли за распространением радиоволн от трех передатчиков, установленных на каждой ракете. Передатчики работали на частотах 24, 48 и 144 *Мгц*. Концентрация свободных электронов определялась по результатам наблюдений за вращением плоскости поляризации радиоволн по мере подъема ракеты. Одновременно с запуском ракеты проводилось наблюдение за состоянием ионосферы с помощью ионосферной станции, расположенной около места старта ракеты.

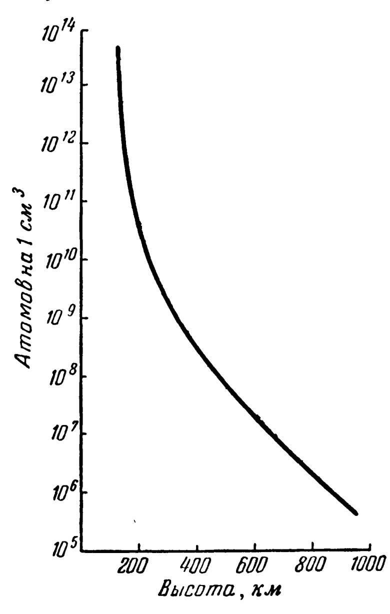


Рис. 20. Плотность верхних слоев атмосферы Земли.

С помощью установленных на третьем ИСЗ ионных ловушек была измерена концентрация положительных ионов в ионосфере до высоты примерно 1 880 *км*.

Чтобы на измерения не влиял корпус контейнера с научной аппаратурой, ловушки были укреплены на длинных штангах над поверхностью спутника. Расположение ловушек на третьем ИСЗ схематически показано на рис. 21. Было установлено, что в области ионосферы отрицательные ионы почти полностью отсутствуют.

Дальнейшие исследования электронной концентрации ионосферы проводились с помощью трех советских космических ракет, запущенных в 1959 г. в направлении Луны. Более полные результаты были получены во время полета второй космической ракеты, которая достигла Луны 14 сентября 1959 г.

Измерения проводились с помощью четырех трехэлектродных ловушек, укрепленных на длинных штангах над поверхностью сферического контейнера. Каждая ловушка состояла из полусферической внешней никелевой сетки радиусом 30 *мм*, внутри которой находился плоский никелевый коллектор. Между коллектором и внешней сеткой была расположена плоская внутренняя сетка из вольфрама. Схема трехэлектродной ловушки показана на рис. 22. Коллектор имел потенциал —50 *в* относительно корпуса контейнера,

Внутренняя сетка — потенциал —200 *в*. Внешние сетки каждой из четырех ловушек имели потенциалы —10 *в*, —5 *в*, 0 *в* и +15 *в*.

Заряженные частицы воздуха, попадая в ловушку, создавали в цепи коллектора ток, который был тем больше, чем больше число заряженных частиц попадало в ловушку.

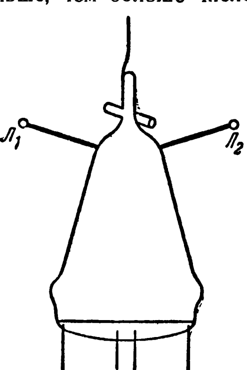


Рис. 21. Схема расположения ловушек на третьем искусственном спутнике Земли.

На рис. 23 приведена кривая зависимости электронной концентрации ионосферы от высоты. Эта кривая построена по результатам измерений, проведенных за время с февраля 1958 г. по сентябрь 1959 г При построении нижней части графика были использованы данные вертикального запуска геофизической ракеты 21 февраля 1958 г. Средняя часть кривой (высота 500—1 000 *км*) построена по данным измерений с помощью третьего ИСЗ во время его 56-го оборота вокруг Земли. Часть графика (высота 1 400—20 000 *км*) построена по данным измерений, выполненных с помощью второй космической ракеты.

Полученные данные трудно переоценить. Во-первых, впервые была экспериментально исследована ионизированная оболочка Земли во всей своей толще. До запусков ИСЗ и космических ракет ионосферу можно было исследовать лишь до высот 300—500 *км*. Во-вторых, впервые определена граница верхней границы ионосферы, которая находится на высоте 15 000—20 000 *км* В третьих, ракетные исследования нижней части ионосферы позволили установить новую область, названную областью *С*. Эта область расположена летом на высоте 57—67 *км*, а зимой — на высоте 57—80 *км*. Возникает она с восходом Солнца и не зависит от времени дня и сезона. Летом области *С* и *D* частично перекрывают друг друга. Зимой, когда область *D* поднимается вверх, область *С* существует самостоятельно.

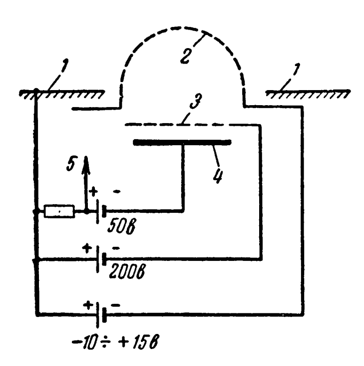


Рис. 22. Схема трехэлектродной ловушки.

1 — корпус контейнера; *2* — внешняя сетка; *3* — внутренняя сетка; *4* — коллектор; *5* — к усилителю.

В результате экспериментальных исследований околоземного пространства с помощью ИСЗ и космических ракет удалось обнаружить три радиационных пояса вокруг Земли. Эти пояса представляют собой скопление электронов и протонов, движущихся с огромной скоростью. Их образование объясняется существованием магнитного поля Земли. Заряженные частицы, испускаемые Солнцем, двигаясь в космическом пространстве и пролетая вблизи Земли, захватываются земным магнитным полем и удерживаются им. Так как скорость частиц

разная, то их потоки располагаются на разных расстояниях от Земли, образуя пояса заряженных частиц, или радиационные пояса.

Существование поясов удалось обнаружить в результате измерения космического излучения счетчиками Гейгера и трехэлектродными ловушками, установленными на спутниках и ракетах.

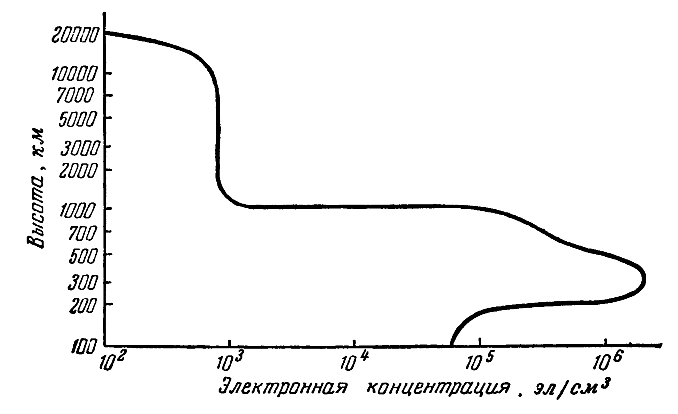


Рис. 23. Зависимость электронной концентрации ионосферы от высоты.

На рис. 24 показано расположение радиационных поясов вокруг Земли. Самый близкий пояс расположен примерно на высоте 1 600 *км* и имеет скорость заряженных частиц от $2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^7$ *эв*.

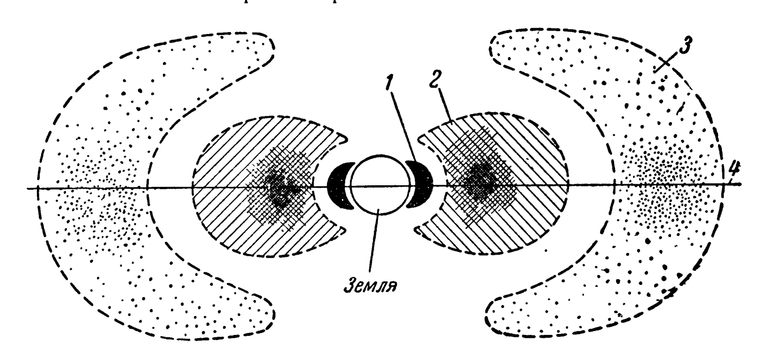


Рис. 24. Схема расположения радиационных поясов вокруг Земли.
1 — внутренний пояс; *2* — внешний пояс; *3* — самый внешний пояс; *4* — геомагнитный экватор.

Следующий радиационный пояс находится приблизительно на высоте 3 600 *км*. Энергия заряженных частиц в этом поясе лежит в пределах от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^7$ *эв*. Самый внешний пояс радиации распо-

ложен на высоте 50 000—75 000 *км*. Энергия заряженных частиц в нем лежит в пределах от $2 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^1$ *эв*.

Радиационные пояса можно представлять как кольцевые токи, существующие в околоземном пространстве. Лежат они в плоскости геомагнитного экватора. Например, величина тока в самом внешнем радиационном поясе составляет примерно $5 \cdot 10^6$ *а*.

Обнаружение поясов радиации вблизи Земли представляет собой важное открытие, так как они весьма опасны для жизни космонавтов. Кроме того, заряженные частицы оказывают влияние на геофизические процессы, в частности вызывают полярные сияния, свечения ночного неба и нагрев атмосферы. Считают, что кольцевые токи в атмосфере тесно связаны с магнитными бурями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История исследований ионосферы насчитывает немногим более 40 лет. Однако за это короткое время удалось сделать многое. В настоящее время выяснена, в основном, структура ионосферы, известны основные причины, вызывающие ионизацию газов, входящих в состав ионосферы, изучены основные закономерности процессов, происходящих в ней, и их влияние на распространение радиоволн.

Большой вклад в дело познания ионосферы и исследования распространения радиоволн внесли советские ученые и инженеры. Ряд крупных открытий в ионосфере связан с именами М. В. Шулейкина, М. А. Бонч-Бруевича, А. Н. Щукина, В. Н. Кессениха, Н. И. Кабанова и других ученых. Благодаря мастерству и изобретательности конструкторов радиоаппаратуры были созданы оригинальные устройства и приборы для исследования ионосферы. Здесь в первую очередь необходимо упомянуть имена Ф. Я. Заборщикова, Н. Д. Булатова и др. С точки зрения современных взглядов ионосфера представляет собой ионизированную область атмосферы, простирающуюся примерно от 60 до 20 000 *км* над поверхностью Земли. Основным источником ионизации являются ультрафиолетовое и корпускулярное излучения Солнца. Поэтому процессы, происходящие в ионосфере, тесным образом связаны с активностью солнечной деятельности.

Основные регулярные изменения состояния ионосферы: суточные, сезонные и 11-летние. Помимо таких регулярных изменений, в ионосфере происходят время от времени нерегулярные явления. К ним относятся: возмущения ионосферных слоев, появление резких неоднородностей в слое E в виде спорадического слоя E_s и внезапные ионосферные поглощения. Ионосферные возмущения и внезапные поглощения являются причиной нарушения работы коротковолновых линий радиосвязи. Они особенно часто бывают в полярных районах.

Методы исследования ионосферы весьма разнообразны, но, пожалуй, наиболее распространенный метод — это изучение ионосферы при помощи автоматической ионосферной станции, которая может круглосуточно регистрировать критические частоты и высоты ионосферных слоев. Материалы наблюдений на таких станциях послужили базой для установления основных закономерностей процессов, происходящих в ионосфере.

В настоящее время существует много других методов исследования ионосферы Однако значение ионосферных станций не уменьшится. В будущем они найдут широкое распространение. Они будут непрерывно совершенствоваться, а их сеть — постоянно расти.

Другим действенным способом исследования ионосферы служит метод возвратно-наклонного зондирования, использование которого основано на эффекте Кабанова. С помощью этого метода получают оперативные сведения о распространении коротких радиоволн на конкретных линиях связи. Методом возвратно-наклонного зондирования можно получить сведения о скорости перемещения ионосферных неоднородностей. Он позволяет также наблюдать за спорадическим слоем E_s, участвующим при дальнем распространении УКВ.

Открытие Н. И. Кабановым явления рассеяния земной поверхностью части электромагнитной энергии, падающей на эту поверхность, имеет большое практическое значение. Используя эффект Кабанова, можно проводить радиолокацию на больших расстояниях практически любой точки земного шара.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 12 коп.